

На правах рукописи



ФЕКЛИН Артём Александрович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА ОБДЕЛОК ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ
ТОННЕЛЕЙ, СООРУЖАЕМЫХ ВБЛИЗИ НАКЛОННОЙ ЗЕМНОЙ
ПОВЕРХНОСТИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНЫХ ПОРОДАХ**

Специальность: 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет», г. Тула.

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
АНЦИФЕРОВ Сергей Владимирович.

Официальные оппоненты:

ПАНКРАТЕНКО Александр Никитович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительство подземных сооружений и горных предприятий», Национальный исследовательский технологический университет «Московский институт стали и сплавов», г. Москва;

ПАВЛОВА Наталия Сергеевна, кандидат технических наук, главный конструктор, ООО "ПОПГН "Интеграл", г. Тула.

Ведущая организация: ОАО Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт «Ленметрогипротранс», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится «3» апреля 2024 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.417.05 при Тульском государственном университете по адресу: 300012, г. Тула, просп. Ленина, д. 90, 6-й уч. корпус, ауд. 220.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТулГУ (г. Тула, просп. Ленина, 92) и на сайте <http://www.tsu.tula.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные печатью организации, просим высылать по адресу: 300012, г. Тула, просп. Ленина, 92, Ученый совет ТулГУ, факс: +7(4872) 35-81-81.

Автореферат разослан «05» февраля 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Галина Викторовна
Стась

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Геомеханический анализ результатов строительства и мониторинга состояния подземных объектов, сооружаемых закрытым способом в слабых породах, позволяет установить факторы, оказывающие существенное влияние на напряженно-деформированное состояние вмещающего массива пород и обделок тоннелей, учет которых необходим при их проектировании: физико-механические свойства пород; особенности рельефа земной поверхности; компоновка тоннелей и конструкции применяемых обделок; технологии строительства, приводящие к возникновению вокруг выработок зон пород с существенно отличающимися деформационными характеристиками.

В нормативно-технических документах по проектированию и строительству подземных объектов отсутствуют рекомендации по комплексному учету влияния на прочность и несущую способность сооружаемых конструкций перечисленных выше факторов. В настоящее время для расчета подземных конструкций применяются пакеты компьютерных программ, реализующих численные методы решения геомеханических задач. Известно, что получаемые с их использованием результаты требуют дополнительной верификации, выполняемой, в том числе, путем сравнения с данными, полученными для частных случаев аналитическими методами. Следует отметить, что аналитических методов расчета комплексов подземных сооружений, возводимых в районах, отличающихся сложным рельефом, с учетом наличия технологической неоднородности пород до настоящего времени не имелось, т.к. отсутствовали необходимые строгие решения соответствующих задач геомеханики.

Таким образом, разработка аналитического метода расчёта обделок параллельных тоннелей, сооружаемых закрытым способом вблизи наклонной земной поверхности в технологически неоднородных породах, является актуальной задачей, имеющей научную новизну и практическую ценность.

Целью работы является разработка аналитического метода расчета, позволяющего уточнить известные и установить новые закономерности формирования напряжённого состояния элементов геомеханической системы "массив пород с наклонной земной поверхностью - зоны технологически неоднородных пород - обделки параллельных тоннелей" и оценить прочность и несущую способность подземных конструкций.

Идея работы заключается в математическом моделировании процессов взаимодействия конструкций подземных сооружений и окружающего их породного массива при наличии зон пород с отличающимися деформационными характеристиками, включающем решение соответствующей задачи геомеханики и позволяющем определить напряженное состояние подземных конструкций и массива пород.

Методы исследований включают анализ научных публикаций, посвященных применению различных технологий строительства подземных соору-

жений, приводящих к возникновению зон технологически неоднородных пород; расчету подземных конструкций, расположенных вблизи земной поверхности; математическое моделирование взаимодействия элементов геомеханической системы "массив пород с наклонной земной поверхностью - зоны технологически неоднородных пород - обделки параллельных тоннелей"; постановку и решение соответствующей задачи теории упругости; использование для решения задачи теории потенциалов Колосова-Мухелишвили и функций комплексного переменного (ТФКП); компьютерное моделирование на основе разработанного программного обеспечения; анализ и сравнение результатов с данными, полученными другими авторами в частных случаях.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

- математическая модель взаимодействия обделок параллельных тоннелей, сооружаемых вблизи склона, с массивом пород, включающим зоны технологически неоднородности вокруг выработок, базирующаяся на аналитическом решении соответствующей задачи теории упругости, позволяет определять напряжённо-деформированное состояние элементов рассматриваемой геомеханической системы с учётом наличия зон технологически неоднородных пород, наклонной земной поверхности и взаимного влияния тоннелей;

- наличие вокруг выработок, пройденных вблизи склона, зон технологически неоднородных пород оказывает существенное влияние на формирование напряжённого состояния массива пород с наклонной земной поверхностью и конструкций подземных сооружений;

- установление закономерностей формирования напряженного состояния обделок параллельных тоннелей, сооружаемых вблизи склона, с учётом зон технологически неоднородных пород возможно на основе применения разработанного метода расчёта, комплексно учитывающего влияние основных факторов - рельеф земной поверхности, компоновку тоннелей, наличие вокруг выработок зон технологически неоднородных пород, физико-механические свойства массива пород и материалов обделок;

- зоны пород вокруг выработок, подверженных инъекционному укреплению и не испытывающих значительного влияния земной поверхности или соседних подземных сооружений, приводят, как правило, к снижению напряжений, возникающих в обделке. Появление таких зон при компактном расположении тоннелей вблизи наклонной земной поверхности может приводить к увеличению значений максимальных напряжений в обделках.

Новизна научных результатов работы:

- математическая модель взаимодействия обделок параллельных тоннелей, расположенных вблизи склона, и массива пород, включающего зоны его технологической неоднородности;

- аналитическое решение задачи теории упругости о равновесии весомой линейно деформируемой полубесконечной среды с наклонной границей, ослабленной круговыми отверстиями, подкреплёнными кольцами, вокруг кото-

рых выделены концентрические области из материала с отличающимися деформационными характеристиками, моделирующие соответственно массив пород, зоны технологически неоднородных пород и обделки тоннелей, полученное с использованием математического аппарата ТФКП и комплексных потенциалов Колосова-Мухелишвили;

- аналитический метод расчета обделок параллельных тоннелей, сооруженных в технологически неоднородных породах вблизи склона, позволяющий учесть основные факторы, существенно влияющие на их напряженное состояние;

- закономерности формирования напряженного состояния обделок тоннелей и массива пород при различных сочетаниях основных влияющих факторов.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается использованием классических гипотез и положений геомеханики, механики подземных сооружений, теории упругости и ТФКП; применением адекватной математической модели, включающей постановку и строгое аналитическое решение задачи теории упругости с использованием апробированного математического аппарата; достижением высокой точности удовлетворения граничных условий задачи; согласованием результатов расчётов с данными, полученными другими авторами для частных случаев.

Личный вклад автора заключается в выполнении анализа научных публикаций по теме исследования; разработке математической модели, включающей обоснование расчётной схемы, постановку и получение решения соответствующей задачи теории упругости; разработке алгоритма и метода расчета, реализованных в виде программного обеспечения; установлении на примере двух параллельных тоннелей, сооружённых вблизи склона, закономерностей формирования напряженного состояния обделок и массива пород в естественном и технологически изменённом состояниях.

Практическое значение работы определяется:

- составленным алгоритмом расчета обделок параллельных тоннелей кругового поперечного сечения, сооруженных закрытым способом в технологически неоднородных породах вблизи наклонной земной поверхности;

- разработанным программным обеспечением, позволяющим на этапе проектирования подземных сооружений оценить несущую способность массива пород в естественном и изменённом состояниях, а так же прочность обделок тоннелей;

- установленными закономерностями формирования напряженного состояния массива пород и обделок тоннелей при различных сочетаниях основных влияющих факторов.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава ТулГУ (Тула, 2020 - 2023); Межрегиональных научных сессиях

молодых исследователей: "Промышленная революция 4.0: взгляд молодежи" (Тула, 2020 - 2022); Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики "Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики" (Тула, 2021 - 2023); Международном научном симпозиуме «Неделя Горняка» (Москва, 2021 - 2023); Китайско-Российском форуме молодых исследователей в области геотехники и подземных сооружений (Москва, 2022); Всероссийской научной конференции с международным участием "Геодинамика и напряженное состояние недр земли" (Новосибирск, 2021, 2023); XII Всероссийской конференции "Молодежная наука в развитии регионов" (Березники, 2022, 2023); XVI Всероссийской молодежной научно-практической конференции "Проблемы недропользования" (Екатеринбург, 2022).

Публикации. По теме научно-квалификационной работы опубликовано 15 печатных работ, из них 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, и 12 в рецензируемых изданиях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 198 страницах машинописного текста, состоит из введения, 5 глав, 35 рисунков и 18 таблиц, заключения, списка литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Результаты исследований, выполненных Безродным К.П., Булычевым Н.С., Кавказским В.Н., Лебедевым М.О., Макаровым В.В., Панкратенко А.Н., Протосеней А.Г., Руппением К.В., Фроловым Ю.С., Шейниным В.И. и другими учеными в значительной мере способствовали установлению и изучению закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния подземных конструкций и вмещающего массива пород. К настоящему времени Анциферовым С.В., Деевым П.В., Саммалем А.С., Фоминым А.В. на единой научно-методологической основе, использующей теоретические подходы, развитые Шерманом Д.И., Арамановичем И.Г., Фотиевой Н.Н., разработаны аналитические методы расчета обделок тоннелей мелкого заложения, в том числе - расположенных вблизи наклонной земной поверхности.

Исходя из этого, новый метод расчета обделок параллельных тоннелей, сооруженных в неоднородных породах вблизи склона, базируется на накопленном объеме теоретических и практических знаний в области разработки и совершенствования аналитических методов расчета и результатах математического моделирования взаимодействия элементов единой геомеханической системы "массив пород с наклонной земной поверхностью - зоны технологически неоднородных пород - обделки параллельных тоннелей".

Для достижения цели диссертационного исследования использованы теоретические положения геомеханики и механики подземных сооружений о совместном деформировании массива пород и обделок тоннелей как элементов

единой деформируемой системы. Разработанный метод расчета базируется на предложенной математической модели формирования напряженного состояния элементов геомеханической системы "массив пород с наклонной поверхностью - зоны технологически неоднородных пород - обделки параллельных тоннелей", которая позволяет учитывать следующие основные факторы, оказывающие существенное влияние на напряженное состояние обделок тоннелей и массива пород, включая зоны неоднородности: рельеф земной поверхности, характеризующийся преобладающим углом её наклона к горизонту; количество тоннелей в комплексе; глубину заложения каждого из тоннелей относительно наклонной земной поверхности; размеры поперечных сечений выработок и применяемых обделок; наличие зон технологически неоднородных пород вокруг тоннелей и размеры их поперечных сечений; физико-механические и деформационные характеристики массива пород в естественном состоянии и технологически неоднородных пород; деформационные характеристики материалов обделок; наличие полей начальных напряжений в массиве пород в естественном состоянии и в зонах, моделирующих породы с измененными свойствами, обусловленных гравитационными силами; последовательность сооружения тоннелей и отставание возведения обделок от забоя в каждом из тоннелей с использованием корректирующих множителей.

В основу модели положено аналитическое решение плоской задачи теории упругости, расчётная схема которой приведена на рис. 1.

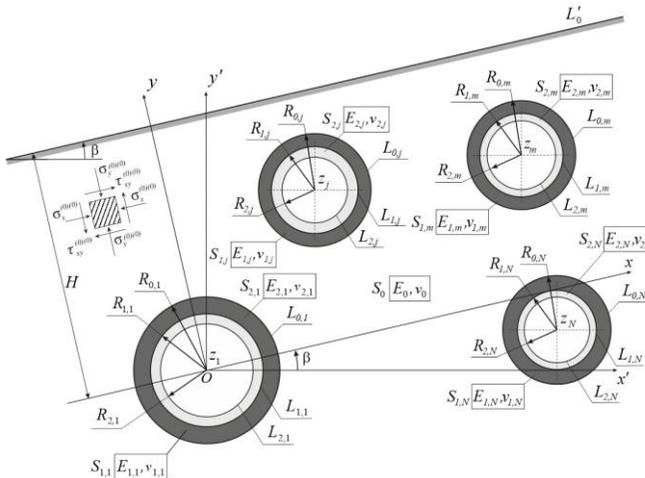


Рис.1. Расчетная схема

На схеме полубесконечная линейно-деформируемая среда S_0 , моделирующая массив пород, ограничена прямой L'_0 , образующей угол β с гори-

зонтально. Материал среды характеризуется удельным весом γ , коэффициентом бокового давления λ , модулем деформации E_0 и коэффициентом Пуассона ν_0 . Среда ослаблена конечным числом N круговых отверстий, центры которых имеют комплексные координаты $z_m = x_m + iy_m$ ($m=1, \dots, N$) в системе отсчета, начало которой совпадает с центром первого отверстия, расположенного на расстоянии H от линии L_0 . Вокруг отверстий выделены области $S_{1,m}$ с наружными контурами $L_{0,m}$, моделирующие зоны пород с деформационными характеристиками $E_{1,m}$, $\nu_{1,m}$ ($m=1, \dots, N$). Удельный вес γ и коэффициент бокового давления λ материалов областей $S_{1,m}$ и S_0 принимаются одинаковыми. Отверстия подкреплены кольцами $S_{2,m}$ с внутренними контурами $L_{2,m}$ ($m=1, \dots, N$), моделирующими обделки тоннелей. Материалы колец $S_{2,m}$ имеют деформационные характеристики $E_{2,m}$, $\nu_{2,m}$ ($m=1, \dots, N$). Весом обделок по сравнению с весом массива пород пренебрегаем.

В весомых среде S_0 и шайбах $S_{1,m}$ ($m=1, \dots, N$) действуют неравнокомпонентные поля начальных напряжений:

$$\begin{aligned} \sigma_x^{(0)(0)} = \sigma_x^{(1,m)(0)} = -\lambda\gamma(H-y)\cos\beta; \quad \sigma_y^{(0)(0)} = \sigma_y^{(1,m)(0)} = -\gamma(H-y)\cos\beta; \\ \tau_{xy}^{(0)(0)} = \tau_{xy}^{(1,m)(0)} = -\gamma(H-y)\sin\beta. \end{aligned} \quad (1)$$

Полные напряжения $\sigma_x^{(0)*}$, $\sigma_y^{(0)*}$, $\tau_{xy}^{(0)*}$ в среде S_0 и $\sigma_x^{(1,m)*}$, $\sigma_y^{(1,m)*}$, $\tau_{xy}^{(1,m)*}$ в областях $S_{1,m}$ ($m=1, \dots, N$) представляются в виде сумм начальных и искомым дополнительных напряжений $\sigma_x^{(0)}$, $\sigma_y^{(0)}$, $\tau_{xy}^{(0)}$; $\sigma_x^{(1,m)}$, $\sigma_y^{(1,m)}$, $\tau_{xy}^{(1,m)}$:

$$\sigma_x^{(0)*} = \sigma_x^{(0)} + \sigma_x^{(0)(0)}; \quad \sigma_y^{(0)*} = \sigma_y^{(0)} + \sigma_y^{(0)(0)}; \quad \tau_{xy}^{(0)*} = \tau_{xy}^{(0)} + \tau_{xy}^{(0)(0)}; \quad (2)$$

$$\sigma_x^{(1,m)*} = \sigma_x^{(1,m)} + \sigma_x^{(1,m)(0)}; \quad \sigma_y^{(1,m)*} = \sigma_y^{(1,m)} + \sigma_y^{(1,m)(0)}; \quad \tau_{xy}^{(1,m)*} = \tau_{xy}^{(1,m)} + \tau_{xy}^{(1,m)(0)}. \quad (3)$$

В кольцах $S_{2,m}$ ($m=1, \dots, N$) искомые дополнительные напряжения являются полными. Смещения рассматриваются только дополнительные.

Граница L_0 полуплоскости S_0 и контуры $L_{2,m}$ колец $S_{2,m}$ ($m=1, \dots, N$) свободны от действия внешних сил. Среда S_0 , шайбы $S_{1,m}$ и кольца $S_{2,m}$ деформируются совместно, т.е. на линиях $L_{0,m}$, $L_{1,m}$ ($m=1, \dots, N$) выполняются условия непрерывности векторов полных напряжений и смещений:

$$\sigma_y^{(0)*} = 0, \quad \tau_{xy}^{(0)*} = 0 \quad \text{на } L_0; \quad (4)$$

$$\sigma_r^{(1,m)*} = \sigma_r^{(0)*}, \quad \tau_{r\theta}^{(1,m)*} = \tau_{r\theta}^{(0)*}; \quad u^{(1,m)} = u^{(0)}, \quad v^{(1,m)} = v^{(0)} \quad \text{на } L_{0,m} \quad (m=1, \dots, N); \quad (5)$$

$$\sigma_r^{(2,m)*} = \sigma_r^{(1,m)*}, \tau_{r\theta}^{(2,m)*} = \tau_{r\theta}^{(1,m)*}; u^{(2,m)} = u^{(1,m)}, v^{(2,m)} = v^{(1,m)} \text{ на } L_{1,m} \text{ (} m=1, \dots, N \text{)}; \quad (6)$$

$$\sigma_r^{(2,m)*} = 0; \tau_{r\theta}^{(2,m)*} = 0 \text{ на } L_{2,m} \text{ (} m=1, \dots, N \text{)}. \quad (7)$$

В (5) - (7) $\sigma_r^{(l,m)*}, \tau_{r\theta}^{(l,m)*}$ - полные радиальные и касательные напряжения; $u^{(l,m)}, v^{(l,m)}$ - дополнительные радиальные и окружные смещения в точках областей $S_{l,m}$ ($l=0, 1, 2; m=1, \dots, N$) в полярных системах координат.

Решение поставленной задачи теории упругости после перехода к соответствующей краевой задаче ТФКП для многосвязной кусочно-однородной области (рис. 1) получено с использованием математического аппарата ТФКП.

Напряженно-деформированное состояние элементов рассматриваемой системы определяется комплексными потенциалами Колосова-Мусхелишвили - $\tilde{\varphi}_0(z), \tilde{\psi}_0(z); \tilde{\varphi}_{1,m}(z), \tilde{\psi}_{1,m}(z)$ и $\tilde{\varphi}_{2,m}(z), \tilde{\psi}_{2,m}(z)$, регулярными соответственно в области S_0 , в шайбах $S_{1,m}$ и кольцах $S_{2,m}$ ($m=1, \dots, N$) и с учетом неинвариантности функций $\tilde{\psi}_0(z), \tilde{\psi}_{1,m}(z), \tilde{\psi}_{2,m}(z)$ представляемыми в виде:

$$\tilde{\varphi}_0(z) = \sum_{j=1}^N \tilde{\varphi}_{0,j}(z - z_j), \tilde{\psi}_0(z) = \sum_{j=1}^N \left[\tilde{\psi}_{0,j}(z - z_j) - \overline{z_j \tilde{\varphi}'_{0,j}(z - z_j)} \right], \quad (8)$$

$$\tilde{\varphi}_{1,m}(z) = \varphi_{1,m}^*(z - z_m), \tilde{\psi}_{1,m}(z) = \psi_{1,m}^*(z - z_m) - \overline{z_m \varphi_{1,m}^*(z - z_m)}, \quad (9)$$

$$\tilde{\varphi}_{2,m}(z) = \varphi_{2,m}(z - z_m), \tilde{\psi}_{2,m}(z) = \psi_{2,m}(z - z_m) - \overline{z_m \varphi'_{2,m}(z - z_m)}. \quad (10)$$

Функции $\tilde{\varphi}_{0,j}(z - z_j), \tilde{\psi}_{0,j}(z - z_j)$ регулярны соответственно в области S_0 вне контуров $L_{0,j}$; $\varphi_{1,m}^*(z - z_m), \psi_{1,m}^*(z - z_m)$ - в областях $S_{1,m}$; $\varphi_{2,m}(z - z_m), \psi_{2,m}(z - z_m)$ - в областях $S_{2,m}$ ($m=1, \dots, N$).

Граничные условия краевой задачи ТФКП имеют вид ($m=1, \dots, N$):

$$\tilde{\varphi}_0(t_0) + \overline{t_0 \tilde{\varphi}'_0(t_0)} + \overline{\tilde{\psi}_0(t_0)} = 0 \text{ на } L_0; \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \tilde{\varphi}_{1,m}(t_{0,m}) + \overline{t_{0,m} \tilde{\varphi}'_{1,m}(t_{0,m})} + \overline{\tilde{\psi}_{1,m}(t_{0,m})} = \\ = \tilde{\varphi}_0(t_{0,m}) + \overline{t_{0,m} \tilde{\varphi}'_0(t_{0,m})} + \overline{\tilde{\psi}_0(t_{0,m})}, \\ \mathfrak{a}_{1,m} \tilde{\varphi}_{1,m}(t_{0,m}) - \overline{t_{0,m} \tilde{\varphi}'_{1,m}(t_{0,m})} - \overline{\tilde{\psi}_{1,m}(t_{0,m})} = \\ = \frac{\mu_{1,m}}{\mu_0} \left[\mathfrak{a}_0 \tilde{\varphi}_0(t_{0,m}) - \overline{t_{0,m} \tilde{\varphi}'_0(t_{0,m})} - \overline{\tilde{\psi}_0(t_{0,m})} \right]; \end{aligned} \right. \text{ на } L_{0,m}; \quad (12)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \overline{\tilde{\varphi}_{2,m}(t_{1,m}) + t_{1,m}\tilde{\varphi}'_{2,m}(t_{1,m}) + \tilde{\psi}_{2,m}(t_{1,m})} &= \\ &= \overline{\tilde{\varphi}_{1,m}(t_{1,m}) + t_{1,m}\tilde{\varphi}'_{1,m}(t_{1,m}) + \tilde{\psi}_{1,m}(t_{1,m})} + f_m(t_{1,m}), \\ \mathfrak{a}_{2,m}\tilde{\varphi}_{2,m}(t_{1,m}) - t_{1,m}\tilde{\varphi}'_{2,m}(t_{1,m}) - \tilde{\psi}_{2,m}(t_{1,m}) &= \\ &= \frac{\mu_{2,m}}{\mu_{1,m}} \left[\mathfrak{a}_{1,m}\tilde{\varphi}_{1,m}(t_{1,m}) - t_{1,m}\tilde{\varphi}'_{1,m}(t_{1,m}) - \tilde{\psi}_{1,m}(t_{1,m}) \right] \end{aligned} \right. \quad \text{на } L_{1,m}; \quad (13)$$

$$\overline{\tilde{\varphi}_{2,m}(t_{2,m}) + t_{2,m}\tilde{\varphi}'_{2,m}(t_{2,m}) + \tilde{\psi}_{2,m}(t_{2,m})} = 0 \quad \text{на } L_{2,m}. \quad (14)$$

Здесь и далее принято

$$\mathfrak{a}_0 = 3 - 4\nu_0, \quad \mu_0 = \frac{E_0}{2(1+\nu_0)}, \quad \mathfrak{a}_{l,m} = 3 - 4\nu_{l,m}, \quad \mu_{l,m} = \frac{E_{l,m}}{2(1+\nu_{l,m})} \quad (l=1,2); \quad (15)$$

$$t_0 = x + iH; \quad t_{l,m} = z_m + R_{l,m}e^{i\theta} = R_{l,m}\sigma \quad (l=0,1,2; m=1,\dots,N), \quad \sigma = e^{i\theta}; \quad (16)$$

θ - угол, отсчитываемый от оси Ox' против хода часовой стрелки.

Функции $f_m(z)$, обусловленные наличием на контурах $L_{1,m}$ главных векторов внешних усилий $X^{(1,m)(0)}$, $Y^{(1,m)(0)}$ ($m=1,\dots,N$), принимают вид

$$\begin{aligned} f_m(t_{1,m}) &= i \int_0^{t_{1,m}} (X_n^{(1,m)(0)} + iY_n^{(1,m)(0)}) ds_{1,m} = -\frac{\gamma R_{1,m}^2}{4} \left[-\left(i \cdot \frac{1-\lambda}{2} \cos\beta + \sin\beta \right) \sigma^{-2} + \right. \\ &+ \frac{4H_m}{R_{1,m}} \left(\frac{1-\lambda}{2} \cos\beta - i \sin\beta \right) \sigma^{-1} + \frac{4H_m}{R_{1,m}} \frac{1+\lambda}{2} \cos\beta \cdot \sigma + i \cdot \frac{1+\lambda}{2} \cos\beta \cdot \sigma^2 - 2ie^{-i\beta} \ln\sigma \left. \right]. \quad (17) \end{aligned}$$

Главные векторы усилий на контурах $L_{1,j}$ ($j=1,\dots,N$) равны

$$X^{(1,j)(0)} + iY^{(1,j)(0)} = 2\pi K_j, \quad K_j = \frac{\gamma R_{1,j}^2}{2} e^{-i\beta}. \quad (18)$$

Функции $\tilde{\varphi}_{0,j}(z-z_j)$, $\tilde{\psi}_{0,j}(z-z_j)$ с учетом наличия на контурах $L_{0,j}$ ($j=1,\dots,N$) главных векторов внешних усилий имеют вид

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}_{0,j}(z-z_j) &= \varphi_{0,j}^*(z-z_j) - \frac{iK_j}{1+\mathfrak{a}_0} \left[\ln(z-z_j) + \mathfrak{a}_0 \ln(z-z_j-2iH_j) \right]; \\ \tilde{\psi}_{0,j}(z-z_j) &= \psi_{0,j}^*(z-z_j) - \frac{iK_j}{1+\mathfrak{a}_0} \left[\mathfrak{a}_0 \ln(z-z_j) + \ln(z-z_j-2iH_j) \right], \end{aligned} \quad (19)$$

функции $\varphi_{0,j}^*(z-z_j)$, $\psi_{0,j}^*(z-z_j)$ также регулярны в области S_0 вне контуров $L_{0,j}$ ($j=1,\dots,N$), включая бесконечно удаленную точку.

Функции $\varphi_{1,m}^*(z-z_m)$, $\psi_{1,m}^*(z-z_m)$ отыскиваются в виде

$$\begin{aligned}\varphi_{1,m}^*(z-z_m) &= \varphi_{1,m}(z-z_m) - \frac{iK_m}{1+\mathfrak{a}_{1,m}} \ln \frac{z-z_m}{R_{1,m}}; \\ \psi_{1,m}^*(z-z_m) &= \psi_{1,m}(z-z_m) - \frac{\overline{iK_m}}{1+\mathfrak{a}_{1,m}} \mathfrak{a}_{1,m} \ln \frac{z-z_m}{R_{1,m}},\end{aligned}\quad (20)$$

функции $\varphi_{1,m}(z-z_m)$, $\psi_{1,m}(z-z_m)$ регулярны внутри шайб $S_{1,m}$ ($m=1, \dots, N$).

Для выполнения аналитического продолжения комплексных потенциалов $\varphi_{0,j}^*(z-z_j)$, $\psi_{0,j}^*(z-z_j)$ через границу полуплоскости вводятся функции $\varphi_{0,j}(z-z_j)$, $\psi_{0,j}(z-z_j)$, регулярные в полной плоскости вне j -того отверстия ($j=1, \dots, N$) и представляемые в виде рядов

$$\varphi_{0,j}(z-z_j) = \sum_{k=1}^{\infty} c_k^{(1)(0,j)} \left(\frac{z-z_j}{R_{0,j}} \right)^{-k}; \quad \psi_{0,j}(z-z_j) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k^{(2)(0,j)} \left(\frac{z-z_j}{R_{0,j}} \right)^{-k} \quad (21)$$

с подлежащими определению коэффициентами $c_k^{(1)(0,j)}$, $c_k^{(2)(0,j)}$.

Для функций $\tilde{\varphi}_{0,j}(z-z_j)$, $\tilde{\psi}_{0,j}(z-z_j)$ ($j=1, \dots, N$) на контурах $L_{0,m}$ ($m=1, \dots, N$), пренебрегая константами, не влияющими на напряженное состояние, из условия (11) в итоге получено:

$$\begin{aligned}\tilde{\varphi}_{0,j}(t_{0,m}-z_j) &= \lambda_{j,m} \sum_{k=1}^{\infty} c_k^{(1)(0,m)} \sigma^{-k} + \sum_{k=1}^{\infty} C_k^{(3)(m,j)} \sigma^k - \lambda_{j,m} \frac{iK_m}{1+\mathfrak{a}_0} \ln \sigma; \\ \tilde{\psi}_{0,j}(t_{0,m}-z_j) &= \lambda_{j,m} \sum_{k=1}^{\infty} c_k^{(2)(0,m)} \sigma^{-k} + \sum_{k=1}^{\infty} C_k^{(4)(m,j)} \sigma^k - \lambda_{j,m} \frac{\overline{iK_m}}{1+\mathfrak{a}_0} \mathfrak{a}_0 \ln \sigma,\end{aligned}\quad (22)$$

где

$$C_k^{(3)(m,j)} = c_k^{(3)(m,j)} + \tilde{c}_k^{(3)(m,j)}; \quad C_k^{(4)(m,j)} = c_k^{(4)(m,j)} + \tilde{c}_k^{(4)(m,j)}; \quad (23)$$

$$\begin{aligned}c_k^{(3)(m,j)} &= \sum_{n=1}^{\infty} \left[(1-\lambda_{j,m}) I_{k,n}^{(m,j)} c_n^{(1)(0,j)} + \right. \\ &\quad \left. + n \delta_{m,j}^{(0)} \left(\tilde{I}_{k-1,n+1}^{(m,j)} + (\varepsilon_{m,j})^{-1} \tilde{I}_{k,n+1}^{(m,j)} \right) \overline{c_n^{(1)(0,j)}} - \tilde{I}_{k,n}^{(m,j)} \overline{c_n^{(2)(0,j)}} \right];\end{aligned}\quad (24)$$

$$\begin{aligned}c_k^{(4)(m,j)} &= \sum_{n=1}^{\infty} \left[(1-\lambda_{j,m}) I_{k,n}^{(m,j)} c_n^{(2)(0,j)} - \tilde{I}_{k,n}^{(m,j)} \left((n+1) \overline{c_n^{(1)(0,j)}} + n c_n^{(2)(0,j)} \right) + \right. \\ &\quad \left. + n(n+1) \delta_{m,j}^{(0)} \left(\tilde{I}_{k-1,n+1}^{(m,j)} + \varepsilon_{m,j}^{-1} \tilde{I}_{k,n+1}^{(m,j)} \right) \overline{c_n^{(1)(0,j)}} \right];\end{aligned}$$

$$\tilde{c}_k^{(3)(m,j)} = \frac{1}{1 + \mathfrak{x}_0} \left[2\overline{K}_j \frac{H_j}{R_{0,j}} \tilde{I}_{k,1}^{(m,j)} + iK_j \frac{(-1)^k}{k} \left((1 - \lambda_{m,j}) (\varepsilon_{m,j})^k + \mathfrak{x}_0 (\varepsilon'_{m,j})^k \right) \right]; \quad (25)$$

$$\tilde{c}_k^{(4)(m,j)} = \frac{\overline{K}_j}{1 + \mathfrak{x}_0} \left[2 \frac{H_j}{R_{0,j}} \tilde{I}_{k,1}^{(m,j)} + i \frac{(-1)^k}{k} \left((1 - \lambda_{m,j}) \mathfrak{x}_0 (\varepsilon_{m,j})^k + (\varepsilon'_{m,j})^k \right) \right];$$

$$I_{n,k}^{(m,j)} = C_{-k}^n \delta_{m,j}^{(0)-k} \varepsilon_{m,j}^{n+k}; \quad \tilde{I}_{n,k}^{(m,j)} = C_{-k}^n \delta_{m,j}^{(0)-k} (\varepsilon'_{m,j})^{n+k}; \quad C_{-k}^n = (-1)^n \frac{(k+n-1)!}{(k-1)!n!}; \quad (26)$$

$$\varepsilon_{m,j} = \frac{R_{0,m}}{z_m - z_j} \quad (j \neq m); \quad \varepsilon'_{m,j} = \left(\frac{z_m - z_j}{R_{0,m}} - 2i \frac{H_j}{R_{0,j}} \delta_{m,j}^{(0)-1} \right)^{-1}; \quad \delta_{m,j}^{(0)} = \frac{R_{0,m}}{R_{0,j}}. \quad (27)$$

В (22), (24), (25) принято $\lambda_{j,m} = 1$ при $j = m$ и $\lambda_{j,m} = 0$ при $j \neq m$.

Функции $\varphi_{1,m}(z - z_m)$, $\psi_{1,m}(z - z_m)$, $\varphi_{2,m}(z - z_m)$, $\psi_{2,m}(z - z_m)$ представляются в виде рядов Лорана с неизвестными коэффициентами ($l = 1, 2$)

$$\begin{aligned} \varphi_{l,m}(z - z_m) &= \sum_{k=1}^{\infty} c_k^{(1)(l,m)} \left(\frac{z - z_m}{R_{l,m}} \right)^{-k} + \sum_{k=0}^{\infty} c_k^{(3)(l,m)} \left(\frac{z - z_m}{R_{l,m}} \right)^k, \\ \psi_{l,m}(z - z_m) &= \sum_{k=0}^{\infty} c_k^{(2)(l,m)} \left(\frac{z - z_m}{R_{l,m}} \right)^{-k} + \sum_{k=1}^{\infty} c_k^{(4)(l,m)} \left(\frac{z - z_m}{R_{l,m}} \right)^k. \end{aligned} \quad (28)$$

Для получения разрешающих соотношений в виде бесконечных систем линейных алгебраических уравнений относительно действительных и мнимых частей коэффициентов $c_k^{(1)(0,j)}$, $c_k^{(2)(0,j)}$ определены соотношения между коэффициентами разложений комплексных потенциалов в смежных областях:

$$c_k^{(l)(1,m)} = \delta_{1,0}^{(m)e(l,k)} \left[\sum_{p=1}^2 \sum_{\nu=1}^{\infty} \left(P_{k,\nu}^{(p,l)(0,m)} c_{\nu}^{(p)(0,m)} + Q_{k,\nu}^{(p,l)(0,m)} \overline{c_{\nu}^{(p)(0,m)}} \right) + N_k^{(l)(0,m)} \right]; \quad (29)$$

$$c_k^{(l)(2,m)} = \delta_{2,1}^{(m)e(l,k)} \left[\sum_{p=1}^4 \sum_{\nu=1}^{\infty} \left(P_{k,\nu}^{(p,l)(1,m)} c_{\nu}^{(p)(1,m)} + Q_{k,\nu}^{(p,l)(1,m)} \overline{c_{\nu}^{(p)(1,m)}} \right) + N_k^{(l)(1,m)} \right] \quad (30)$$

с установленными коэффициентами $P_{k,\nu}^{(p,l)(s,m)}$, $Q_{k,\nu}^{(p,l)(s,m)}$, $N_k^{(l)(s,m)}$ ($s = 0, 1$).

В (29), (30) введены параметры $\delta_{s+1,l}^{(m)} = \frac{R_{s+1,m}}{R_{s,m}}$ ($s = 0, 1$); $e(l,k) = \begin{cases} -k & \text{при } l = 1, 2, \\ k & \text{при } l = 3, 4. \end{cases}$

В результате преобразования граничных условий (12) - (14) получены граничные условия краевых задач ТФКП, каждая из которых соответствует одному подкреплённому кольцом отверстию в полной плоскости, вокруг которого

имеется область из материала с отличающимися деформационными характеристиками. Граничные условия указанных задач содержат дополнительные неизвестные коэффициенты в виде рядов Лорана, отвечающие за влияние наклонной границы и соседних подкрепленных кольцами отверстий. Особенностью решения поставленной задачи в целом является использование сходящегося итерационного процесса, на каждом шаге которого последовательно рассматриваются указанные выше задачи, дающие возможность определить неизвестные коэффициенты разложений комплексных потенциалов Колосова-Мухелишвили в ряды Лорана, позволяющие определить напряженно-деформированное состояние рассматриваемых областей.

Полученное решение положено в основу предлагаемого метода расчета обделок параллельных тоннелей, сооруженных в технологически неоднородных породах вблизи наклонной земной поверхности. Метод реализован в виде алгоритма и соответствующего программного обеспечения для ЭВМ. Достоверность расчётов подтверждается установленной высокой точностью удовлетворения граничных условий и практически полным совпадением результатов с данными для частных случаев, полученными аналитическими методами других авторов (Фотиева Н.Н., Анциферов С.В., Саммаль А.С., Корнеева Н.Н., Князева С.В., Фомин А.В.). Компьютерное моделирование при практическом проектировании и в научных целях, выполняемое с использованием разработанного метода расчёта, позволило установить закономерности формирования напряженного состояния массива пород и обделок параллельных тоннелей при различных сочетаниях основных влияющих факторов.

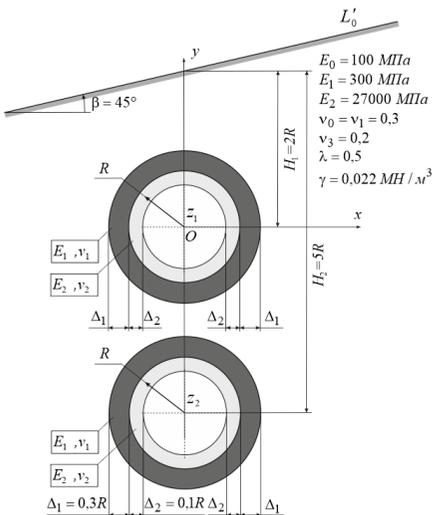


Рис. 2. Расположение тоннелей и исходные данные для расчёта

Ниже приведены результаты расчета монолитных бетонных обделок двух параллельных тоннелей, пройденных в предварительно укрепленном массиве пород. Расположение поперечных сечений, относительные размеры и физико-механические характеристики показаны на рис. 2. Расчётные эпюры нормальных тангенциальных напряжений σ_θ , возникающих на контурах обделок тоннелей при $\beta = 0^\circ$ (зоны укрепленных пород отсутствуют), при $\beta = 45^\circ$ с учётом наличия зон укрепленных пород представлены на рис. 3 (растягивающие напряжения приняты положительными, сжимающие - отрицательными). Сравнение с данными для обделок одиночных тоннелей, расположенных на тех же

глубинах, для двух параллельных тоннелей, сооруженных вблизи горизонтальной поверхности, а также без учета укрепительной цементации позволяет сделать выводы о существенном изменении напряженного состояния обделок.

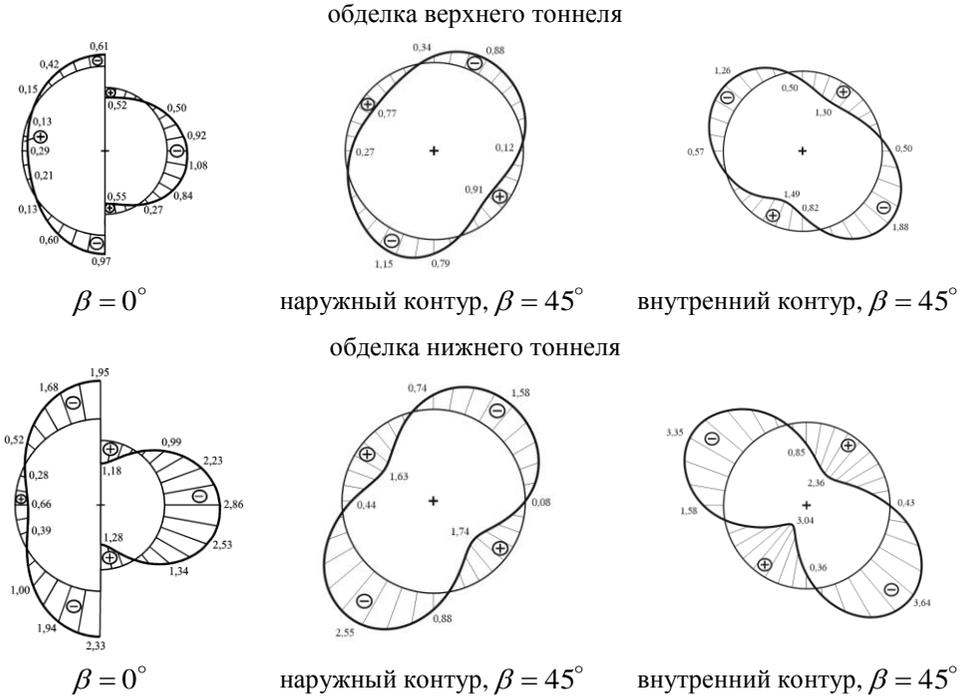


Рис. 3. Расчётные эпюры напряжений на контурах обделок тоннелей

Расчёты подтверждают исчезновение осевой симметрии эпюр и изменение значений экстремальных напряжений σ_θ ; установлена "разгрузка" обделок тоннелей вследствие наличия близко расположенной земной поверхности: при угле наклона поверхности $\beta = 45^\circ$ уменьшение растягивающих напряжений в лотках на 7%, сжимающих напряжений в своде верхнего - на 59% и нижнего - на 20%; соответственно 3-х и 2-х кратное увеличение значений максимальных растягивающих и сжимающих напряжений σ_θ для верхнего, и в 1,4 раза и в 2,8 - соответственно растягивающих и сжимающих напряжений в обделке нижнего тоннеля; уменьшение максимальных сжимающих и растягивающих напряжений соответственно в обделке верхнего тоннеля на 10%, нижнего - на 20%, связанное с наличием зон укреплённых пород.

Представленные результаты соответствуют мгновенному подкреплению отверстий и возникновению зон среды с изменёнными деформационными характеристиками являются завышенными по отношению к напряжениям, реально возникающим в конструкциях обделок тоннелей. Они дают представление о

степени влияния на напряжённое состояние обделок наклонной земной поверхности, зон технологически неоднородных пород, а также взаимного расположения тоннелей. Разработанный метод с использованием известной методики (Фотиева Н.Н., Анциферов С.В.) позволяет выполнить приближенный учет влияния очередности сооружения тоннелей в комплексе, отставание возведения обделок от забоя, а также реологических свойств пород.

На примере двух одинаковых в поперечном сечении параллельных тоннелей (рис. 4) установлены закономерности формирования напряженного состояния их обделок. Для этого выполнены многовариантные расчеты тоннелей при различных сочетаниях основных влияющих факторов для наиболее неблагоприятного случая, обусловленного одновременным появлением подкрепленных отверстий в технологически неоднородной среде.

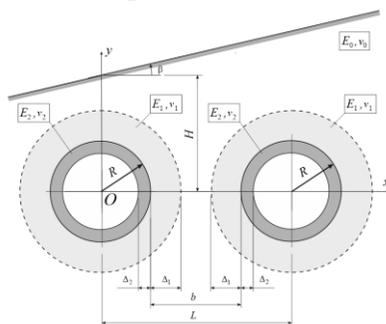


Рис. 4. Компоновка тоннелей

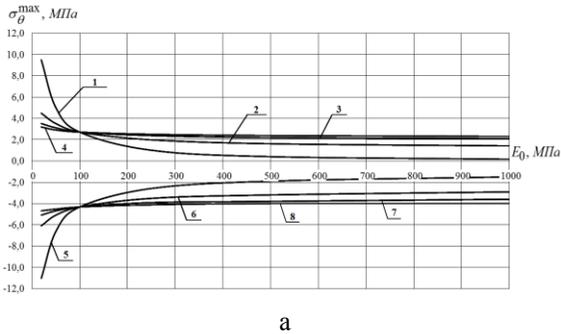
В качестве основных влияющих факторов приняты угол наклона земной поверхности к горизонту; соотношение модулей деформации массива пород в естественном и технологически неоднородном состояниях, материала обделок и вмещающего массива пород; соотношение глубины заложения тоннелей и геометрических размеров поперечного сечения обделок, а также зон технологически неоднородного массива пород; относительная толщина обделок тоннелей; коэффициент бокового давления в массиве пород.

Расчеты выполнены при следующих значениях исходных параметров или диапазонах их изменения: $\gamma = 0,022 \text{ МН} / \text{м}^3$; глубина заложения левого тоннеля по вертикали $H = 5R$; угол наклона земной поверхности $\beta = 0...60^\circ$; расстояние между центрами поперечных сечений выработок $L = 5R ... 10R$; модуль деформации пород в естественном состоянии $E_0 = 20...1000 \text{ МПа}$; коэффициент бокового давления $\lambda = 0...1,0$; толщина зоны укрепленных пород $\Delta_1 = (0...3)R$; модуль деформации укрепленных пород $E_1 = (1...3)E_0$; коэффициент Пуассона пород в естественном и укрепленном состояниях $\nu_0 = \nu_1 = 0,35$; толщина обделки $\Delta_2 = (0,04 ... 0,1)R$; модуль деформации бетона обделки $E_2 = 23000...40000 \text{ МПа}$; коэффициент Пуассона бетона - $\nu_2 = 0,2$.

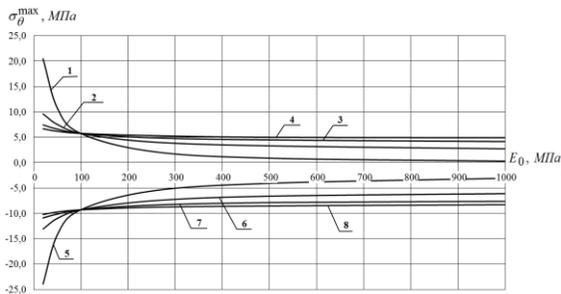
На рис. 5 приведены зависимости максимальных нормальных тангенциальных напряжений σ_θ^{\max} от величины модуля деформации пород при различных толщинах зон технологически неоднородных пород, полученные при $H = 5R$; $\beta = 30^\circ$; $b = 10R$; $\lambda = 0,54$; $E_1 = 100 \text{ МПа}$; $\Delta_2 = 0,08R$; $E_2 = 27000 \text{ МПа}$.

Следует учесть, что при изменении E_0 от 20 МПа до 100 МПа зона тех-

нологически неоднородных пород является, по сути, зоной упрочнённых пород, а при E_0 выше 100МПа - зоной ослабленных пород.



а



б

Рис. 5 - Зависимости σ_{θ}^{\max} от величины E_0 для тоннелей левого (а) и правого (б):
 линии 1, 5 - $\Delta_1 = 0$; 2, 6 - $\Delta_1 = R$;
 3, 7 - $\Delta_1 = 2R$; 4, 8 - $\Delta_1 = 3R$

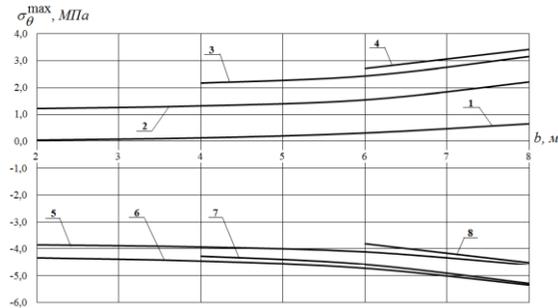
делок тоннелей. Наиболее интенсивно это происходит при изменении модуля деформации пород от 20МПа до 100МПа (линии 2, 6 на рис. 5 а, б). При значениях E_0 , превышающих 100МПа , влияние толщины зоны ослабленных пород на величины экстремальных напряжений весьма мало.

На рис. 6 приведены зависимости напряжений σ_{θ}^{\max} от размера b породного целика при различных углах β наклона земной поверхности. Под размером b понимается расстояние между точками контуров выработок тоннелей по линии, соединяющей центры их поперечных сечений. Расчёты выполнены при $E_0 = 60\text{МПа}$; $\lambda = 0,54$; $\Delta_1 = R$; $E_1 = 100\text{МПа}$; $E_2 = 27000\text{МПа}$; $\Delta_2 = 0,04R$.

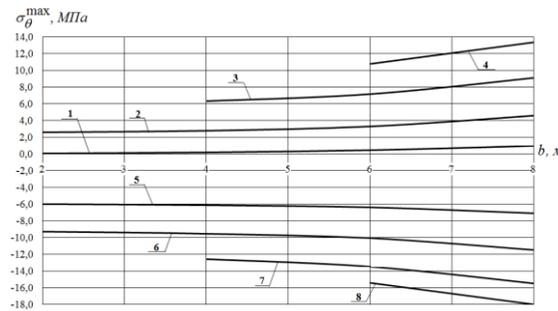
Следует учесть, что принятые расчетные углы наклона земной поверхности с учётом наличия зон технологически неоднородных пород накладывают определённые ограничения на компоновку тоннелей - линия, моделирующая

Общим для приведённых зависимостей является уменьшение по абсолютной величине значений как растягивающих, так и сжимающих напряжений при увеличении модуля деформации E_0 пород в естественном состоянии. Наибольшее влияние увеличение модуля деформации пород на напряжённое состояние обделок проявляется при отсутствии вокруг тоннелей зон технологически неоднородных пород - линии 1, 5 на рис. 5 а, б, иллюстрирующие многократное уменьшение максимальных растягивающих напряжений в обделках обоих тоннелей до практически полного их исчезновения; максимальные сжимающие напряжения также уменьшаются. Наличие зон технологически неоднородных пород и увеличение их толщины приводит к уменьшению значений экстремальных напряжений, возникающих на внутренних контурах обделок.

земную поверхность, не должна пересекать области кольца, моделирующие соответственно зоны технологически неоднородных пород.



а



б

Рис. 6 - Зависимости σ_{θ}^{\max} от ширины целика b для левого (а) и правого (б) тоннелей:
 линии 1, 5 - $\beta = 15^\circ$; 2, 6 - $\beta = 30^\circ$;
 3, 7 - $\beta = 45^\circ$; 4, 8 - $\beta = 60^\circ$

а также установить новые зависимости возникающих в обделках тоннелей напряжений от основных влияющих факторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В научно-квалификационной работе выполнено решение актуальной научной задачи, заключающейся в разработке нового аналитического метода расчета обделок параллельных тоннелей, сооруженных в технологически неоднородных породах вблизи наклонной земной поверхности. Метод расчёта позволяет установить новые и уточнить известные закономерности формирования напряженного состояния массива пород и обделок, что будет способствовать принятию обоснованных рациональных конструктивных и технологических решений, обеспечивающих необходимую прочность обделок тоннелей, предотвращению проявлений опасных горно-геологических явлений. Приме-

Из представленных на рис. 6 зависимостей следует, что с ростом b характер изменения максимальных напряжений в обделках тоннелей, расположенных на разной глубине вблизи земной поверхности, различный: для правого тоннеля, расположенного на большей глубине, выявлена тенденция к увеличению максимальных растягивающих и сжимающих напряжений в обделке с ростом угла наклона земной поверхности (линии 1- 4, 5 - 8 на рис. 6 б). Приведенные результаты исследования напряженного состояния обделок параллельных тоннелей, сооружаемых в технологически неоднородных породах вблизи склона, не охватывают всего возможного многообразия сочетаний основных влияющих факторов. Тем не менее, они позволяют уточнить известные представления о закономерностях формирования напряженного состояния массива пород и обделок,

нение разработанного метода на этапе проектирования подземных сооружений в сложных горно-геологических условиях делает возможным изучение и прогнозирование геомеханических процессов в массивах горных пород.

Основные научные и практические результаты диссертации:

1. Математическая модель взаимодействия обделок параллельных тоннелей кругового поперечного сечения, сооруженных закрытым способом в технологически неоднородных породах вблизи наклонной земной поверхности, базирующаяся на современных положениях геомеханики о совместной работе элементов единой деформируемой системы.

2. Обоснование и постановка соответствующей задачи геомеханики для комплекса параллельных тоннелей, сооруженных вблизи склона, с учётом наличия вокруг выработок зон технологически неоднородных пород при действии гравитационных сил в массиве пород.

3. Строгое аналитическое решение краевой задачи ТФКП, полученное с использованием комплексных потенциалов Колосова-Мухелишвили, позволяющее определять компоненты напряженного состояния элементов рассматриваемой геомеханической системы.

5. Аналитический метод расчета обделок параллельных тоннелей кругового поперечного сечения, сооружаемых закрытым способом в технологически неоднородных породах вблизи наклонной земной поверхности, позволяющий выполнять многовариантные расчеты конструкций обделок тоннелей при практическом проектировании и в научных целях.

6. Алгоритм и компьютерное программное обеспечение, реализующее разработанный метод расчета и представленное к государственной регистрации в Федеральном институте промышленной собственности (Роспатент).

7. Результаты определения напряжённого состояния конструкций подземных сооружений, иллюстрирующие особенности их формирования.

8. Закономерности формирования напряженного состояния массива пород и обделок тоннелей, сооруженных в технологически неоднородных породах вблизи склона, при действии гравитационных сил в массиве пород для различных сочетаний основных влияющих факторов.

Использование разработанного метода расчета в практике проектирования, строительства и эксплуатации подземных сооружений различного назначения, располагающихся в районах со сложным рельефом, будет способствовать научно обоснованному выбору и применению способов и средств освоения подземного пространства.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Анциферов, С.В. Исследование напряженного состояния обделок тоннелей, сооруженных вблизи наклонной земной поверхности/ С.В. Анциферов, А.В. Фомин, А.А. Феклин// Известия Тульского государственного университета. Наука о Земле. – 2021. – № 3. – С. 244-257.

2. Определение напряженного состояния обделок тоннелей, сооружаемых с применением укрепительной цементации вблизи склона/ С.В. Анциферов, **А.А. Феклин**, М.А. Кудрявцев, А.В. Фомин// Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2022. – № 4. – С. 392-407.

3. Анциферов, С. В. Исследование влияния укрепительной цементации пород на напряжённое состояние обделок параллельных тоннелей/ С. В. Анциферов, **А. А. Феклин**// Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2023. – № 3. – С. 475-491.

В рецензируемых изданиях:

4. Фомин, А. В. Разработка математической модели формирования напряженного состояния обделок параллельных тоннелей в технологически неоднородных грунтах вблизи наклонной земной поверхности/ А.В. Фомин, **А.А. Феклин**, М.А. Кудрявцев// Промышленная революция 4.0: взгляд молодежи: Тезисы докл. II Межрегиональной научной конф., Тула, 05–06 ноября 2020 г. – Тула: ТулГУ, 2020. – С. 57-58.

5. Исследование напряженного состояния массива пород и обделок параллельных тоннелей, сооружаемых вблизи горного склона/ С.В. Анциферов, А.В. Фомин, **А.А. Феклин**, М.А. Кудрявцев// Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. Новосибирск, ИГД СО РАН.– 2021.– Т.8, № 1.– С. 20-26.

6. Анциферов, С.В. Математическая модель определения напряженного состояния обделок параллельных тоннелей, сооруженных вблизи наклонной земной поверхности, с учетом технологической неоднородности грунта вокруг выработок/ С.В. Анциферов, К.Е. Залесский, **А.А. Феклин**// Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: Материалы конф., Тула, 01–03 ноября 2021 г. – Тула: ТулГУ, 2021. – С. 582-590.

7. **Феклин, А.А.** Математическое моделирование геомеханической системы «массив пород с наклонной поверхностью - зоны технологически неоднородных пород - обделки параллельных тоннелей»/ А.А. Феклин, С.В. Анциферов, Я.К. Исаева// Промышленная революция 4.0: взгляд молодежи: сб. материалов Межрегиональной научной сессии молодых исследователей, Тула, 01–03 декабря 2021 года. – Тула: ТулГУ, 2021. – С. 180-181.

8. Феклин, А. А. Определение напряженного состояния обделок параллельных тоннелей, сооруженных вблизи склона, с учетом технологической неоднородности грунтов/ А. А. Феклин, Я. К. Исаева, А. А. Трещева// Молодежная наука в развитии регионов. – 2022. – Березники. – Т. 1. – С. 185-190.

9. **Феклин, А.А.** Разработка математической модели формирования напряженного состояния крепи параллельных горных выработок, сооружаемых в зонах технологически неоднородных пород// Проблемы недропользования. – Пермь, ИГД УрО РАН. - 2022. – № 2(33). – С. 83-90.

10. Анциферов, С.В. Напряженное состояние массива грунта вокруг тоннеля, расположенного вблизи склона/ С.В. Анциферов, М.А. Кудрявцев, **А.А. Феклин**// 58-я Научно-практическая конф. профессорско-преподавательского

состава ТулГУ с всероссийским участием: Сб. докл. в 2-х частях, Тула, 08–11 февраля 2022 года. Часть 1. – Тула: ТулГУ, 2022. – С. 179-189.

11. **Феклин, А.А.** Метод расчета обделок тоннелей, сооруженных в технологически неоднородных грунтах вблизи наклонной земной поверхности/ А.А. Феклин, С.В. Анциферов// Промышленная революция 4.0: взгляд молодежи: Тезисы докл. Межрегиональной научной сессии молодых исследователей, Тула, 28–29 ноября 2022 года. – Тула: ТулГУ, 2022. – С. 150-151.

12. Компьютерное моделирование напряженного состояния обделок двух параллельных тоннелей, сооруженных с применением предварительного укрепления грунта вблизи склона/ С. В. Анциферов, **А. А. Феклин**, К. Е. Залесский, А. В. Зинченко// Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: Материалы 18-ой Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики, Тула - Минск - Донецк, 02–03 ноября 2022 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2022. – С. 146-156.

13. **Феклин, А.А.** Учет наличия зон технологически неоднородных пород при исследовании напряженного состояния обделок параллельных тоннелей, сооруженных под склоном/ А.А. Феклин, С.В. Анциферов// Молодежная наука в развитии регионов. – 2023. – Березники. – Т. 1. – С. 305-309.

14. Анциферов, С. В. Исследование напряженного состояния обделок тоннелей, сооруженных горным способом в упрочненных породах вблизи склона/ С. В. Анциферов, **А. А. Феклин**// Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2023. – Новосибирск, ИГД СО РАН. – Т. 10, № 2. – С. 3-9.

15. Анциферов, С. В. Исследование закономерностей формирования напряженного состояния обделок тоннелей, сооружаемых вблизи склона в технологически неоднородных породах/ С. В. Анциферов, **А. А. Феклин**// 59-я Научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава ТулГУ с всероссийским участием: Сборник докладов конференции. В 2-х частях, Тула, 08–12 февраля 2023 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2023. – С. 208-213.

Изд. Лиц. ЛР №020300 от 12.02.97. Подписано в печать 29.01.2024

Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 100 экз. Заказ 001а

Тульский государственный университет. 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92.

Отпечатано в Издательстве ТулГУ, 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92.